

*к.т.н. Кучма С.М.,  
Стародубов С.Ю.  
(ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)*

## **АНАЛІЗ ВПЛИВУ ХОЛОДНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ЕЛІНВАРУ 45НХТВЮ**

*Наведено результати дослідження характеру зміни структурного стану та спеціальних термопружних властивостей елінвару 45НХТВЮ, загартованого від 1 100°С, для різних ступенів холодної деформації. Встановлено фактори позитивного впливу холодної деформації на спеціальні термопружні властивості зазначеного елінвару.*

**Ключові слова:** елінвар, холодна деформація, добротність, температурний коефіцієнт частоти,  $\gamma$ -фаза, текстура, безперервний розпад, переривчастий розпад.

*Приведены результаты исследования характера изменения структурного состояния и специальных термоупругих свойств элинвара 45НХТВЮ, закалённого от 1 100°С, для различных степеней холодной деформации. Установлены факторы положительного влияния холодной деформации на специальные термоупругие свойства указанного элинвара.*

**Ключевые слова:** элинвар, холодная деформация, добротность, температурный коэффициент частоты,  $\gamma$ -фаза, текстура, непрерывный распад, прерывистый распад.

### **Вступ**

В радіоелектронній промисловості та приладобудуванні для виготовлення пружно-чуттєвих елементів, наприклад, резонаторів електромеханічних фільтрів та струнних датчиків, в якості конструкційного матеріалу широко використовуються дисперсійно-твердіючі елінвари. Типовими представниками цієї групи матеріалів є сплави 44НХМТ, 45НХТ та новорозроблений авторами сплав 45НХТВЮ.

Пружно-чуттєві елементи характеризуються мініатюрними розмірами і виготовляються з тонкого елінварного дроту або плющеної стрічки малого перерізу. З цього природним чином випливає вимога додержання жорсткого розмірного співвідношення між параметрами зеренної структури матеріалу пружно-чуттєвого елемента та розмірами перерізу заготовки (наприклад, дроту). У випадку, коли величина зерна виявляється співмірною з перерізом дроту, в умовах високочастотного знакозмінного навантаження вже на початкових циклах може відбуватися руйнування. До того ж існують дані, що розмір зерна чинить суттєвий вплив на величину доброт-

ності та температурних коефіцієнтів модуля пружності і частоти [1].

Відомо, що необхідний комплекс термопружних властивостей елінварів остаточно формується в процесі термомеханічної обробки (ТМО). На сьогодні промисловістю освоєно та запроваджено багато схем ТМО, з яких до елінварів найчастіше застосовуються наступні [2 – 5]:

- 1) загартування + холодна деформація + старіння;
- 2) загартування + холодна деформація + ступінчасте старіння;
- 3) загартування + холодна деформація + динамічне старіння;
- 4) загартування + холодна деформація + динамічне старіння + достарювання.

Отже, в кожній зі схем присутня операція холодної деформації.

В наведених схемах ТМО холодна деформація перш за все забезпечує отримання необхідних поперечних розмірів заготовок. Водночас, холодна деформація загартованих елінварів перед старінням чинить сильний та неоднозначний вплив на механізм розпаду твердого розчину.

### Постановка задачі

Аналіз літературних джерел дозволяє зробити висновок про те, що роль холодної деформації в схемі ТМО елінварів вивчена недостатньо. Тому задачею даної роботи є дослідження ролі операції холодної деформації в схемі ТМО, що має важливе і досить самостійне значення в загальному циклі вивчення технології дисперсійно-твердіючих елінварів, зокрема новорозробленого сплаву 45НХТВЮ.

### Методика досліджень

Дослідження проводилися на зразках експериментальної плавки, виплавленої за технологією, наведеною в [5]. Середня концентрація легувальних елементів в сплаві становила:  $Ni = 45\%$ ;  $Cr = 3,0\%$ ;  $Ti = 2,9\%$ ;  $Al = 0,8\%$ ;  $W_o = 2,5\%$ ;  $Re = 0,2\%$ . За відомою технологією [5] були отримані зразки дроту різного діаметру. Зразки загартовувалися на твердий розчин від  $1100\text{ }^\circ\text{C}$ . Дріт піддавався волочінню на термоволоочільній установці [6] до діаметра  $3,4\text{ мм}$  і мав деформацію: з  $\varnothing 8,4\text{ мм}$  –  $\varepsilon \approx 83\%$ ; з  $\varnothing 6,0\text{ мм}$  –  $\varepsilon \approx 68\%$ ; з  $\varnothing 5,0\text{ мм}$  –  $\varepsilon \approx 54\%$ ; з  $\varnothing 4,5\text{ мм}$  –  $\varepsilon \approx 43\%$ .

Вивчення мікроструктури сплаву 45НХТВЮ проводилося на мікроскопі МИМ-7. Досліджувані зразки елінварного дроту шліфували наждачним папером (від

№320 до №20), піддавали електролітичному травленню та електрополіруванню. Для електрополірування застосовували електроліт наступного складу: оцтова кислота –  $25\text{ мас.}\%$ ; концентрована азотна кислота –  $75\text{ мас.}\%$ . Електрополірування проводили при напрузі  $1,5\text{ В}$ . Електроліт охолоджували до  $-5\dots -10\text{ }^\circ\text{C}$  з метою уникнення потемнення зразка внаслідок нагрівання. Для електролітичного травлення застосовували  $10\text{ мас.}\%$  розчин сірчаної кислоти. При травленні підтримували напругу  $10\text{ В}$  та струм  $2\text{ А}$ . Після травлення зразки промивали проточною водою, спиртом та пасивували водним розчином солей наступного складу:  $\text{NaNO}_3$  (5 вагових частин);  $\text{NaCO}_3$  (1 вагова частина).

Для досліджень текстури застосовували дифрактометр ДРОН-3.

Температурний коефіцієнт частоти (ТКЧ) та добротність визначали за методом вимірювання декременту затухання [7].

### Результати досліджень

Досліджувався вплив ступенів холодної пластичної деформації на ТКЧ та добротність, розробленого сплаву. За отриманими результатами був встановлений характер їх зміни залежно від ступеню деформації (рис. 1).

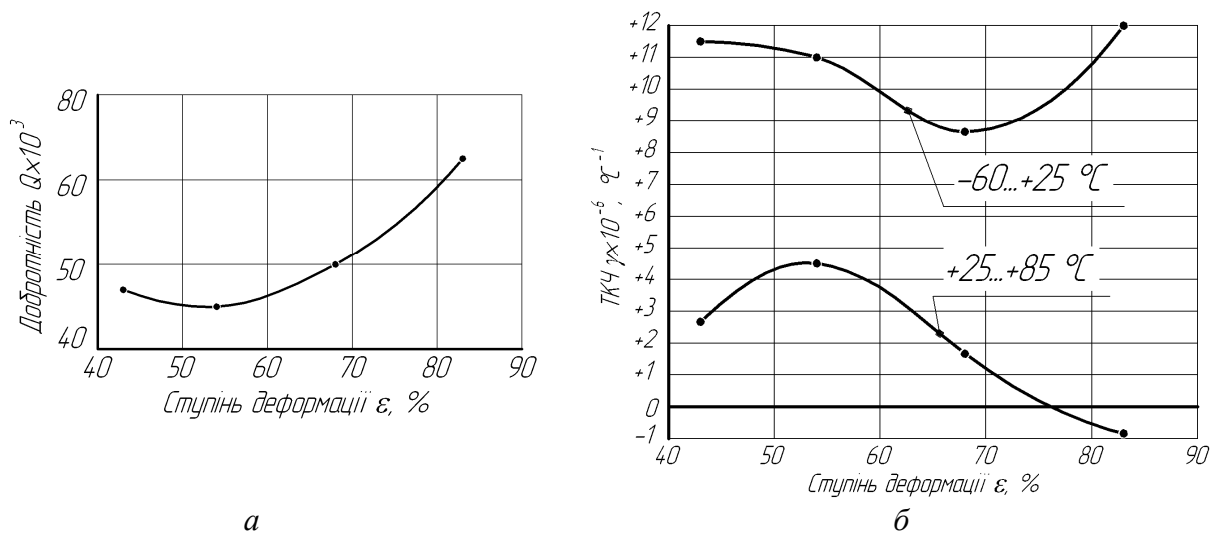


Рисунок 1 – Залежність спеціальних термопружних властивостей сплаву 45НХТВЮ від ступеню деформації

Наведені графіки свідчать, що збільшення ступеню деформації елінвару 45НХТВЮ спочатку призводить до деякого зниження добротності і при  $\varepsilon \approx 54\%$  вона досягає свого мінімуму. Подальше збільшення ступеню деформації викликає стаке зростання добротності. Різниця між мінімальним та максимальним значенням добротності складає 25 000 одиниць.

Вплив ступеню деформації на величину ТКЧ є неоднозначним. Слід відзначити, що незалежно від ступеню деформації величини ТКЧ знаходяться переважно в області додатних значень. Мінімальна розбіжність між ТКЧ в експлуатаційних інтервалах температур  $-60\dots+25^\circ\text{C}$  та  $+25\dots+85^\circ\text{C}$  становить  $7,4 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$  і досягається при  $\varepsilon \approx 68\%$ .

Крім того, результати досліджень структур показали, що після пластичної деформації зі ступенями обтискання 43% та менше (рис. 2), в сплаві зберігається практично рівноважна зеренна структура, де-

формація проявляється виникненням ліній ковзання всередині окремих зерен, які сприятливо орієнтовані відносно напрямку деформування. Зі збільшенням ступеню деформації до 54% спостерігається подрібнення та деяке видовження зерен, а також подальший розвиток ліній ковзання.

При подальшому збільшенні ступенів деформації (68%) в структурі фіксуються границі з зубчастою будовою, яка нагадує класичну модель деформації за схемою «зсув в колоді карт». Це свідчить про накопичення дефектів кристалічної волокнистої будови. При цьому зерна сильно витягнуті в напрямку течії металу, містять багато ліній ковзання. Растрова мікроскопія (рис. 3) фіксує найдрібніші комірчасті виділення всередині зерен, які можна ідентифікувати як зародки  $\gamma'$ -фази приблизного складу  $\text{Ni}_3(\text{Fe}, \text{Ti})$ .

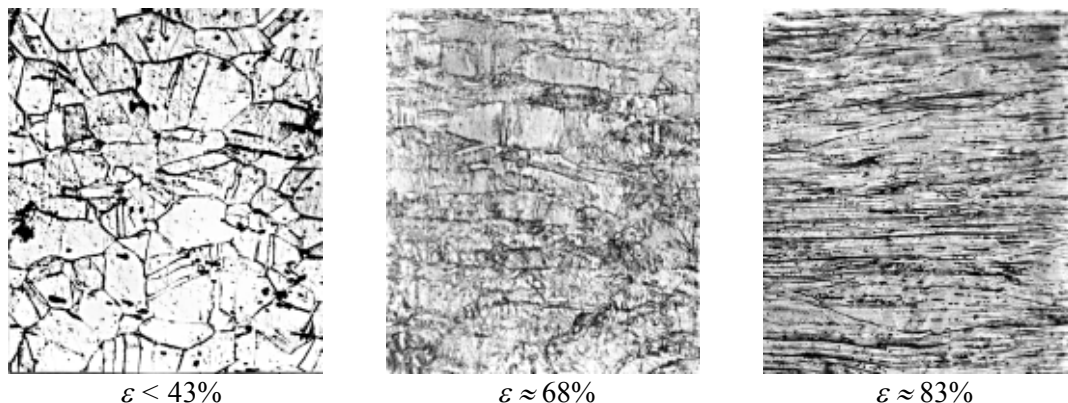


Рисунок 2 – Структура сплаву після загартування та холодної деформації з різними ступенями;  $\times 120$



Рисунок 3 – Структура після загартування та холодної деформації  $\varepsilon \approx 68\%$ ;  $\times 20\,000$

Це можна вважати початком процесів утворення надлишкових фаз. Таким чином, деформація в межах  $\varepsilon \approx 68\%$  змінює механізм виділення  $\gamma'$ -фази, що приводить до виникнення численних центрів переривчастого розпаду всередині зерен. Після деформування сплаву в межах  $\varepsilon \approx 83\%$  виявляється структура з виразною волокнистістю, що неминуче повинно супроводжуватися виникненням анізотропії та текстурою.

Дослідження текстури проводилося на зразках  $\varnothing 3,4$  мм зніманням 4-х полюсних

фігур методом Шульца на відбиття, припускаючи наявність аксіальної текстури.

Аналіз полюсних фігур, представлених на рисунку 4, (111), (200), (220), (311) показав, що зразки з різним ступенем деформування мають однакове орієнтування текстури. Найбільшу ймовірність орієнтування кристалітів має напрям  $\langle 111 \rangle$  вздовж вісі прутка. Зі збільшенням ступеню деформування відхилення  $\langle 111 \rangle$  від напрямку вісі прутка зменшується.

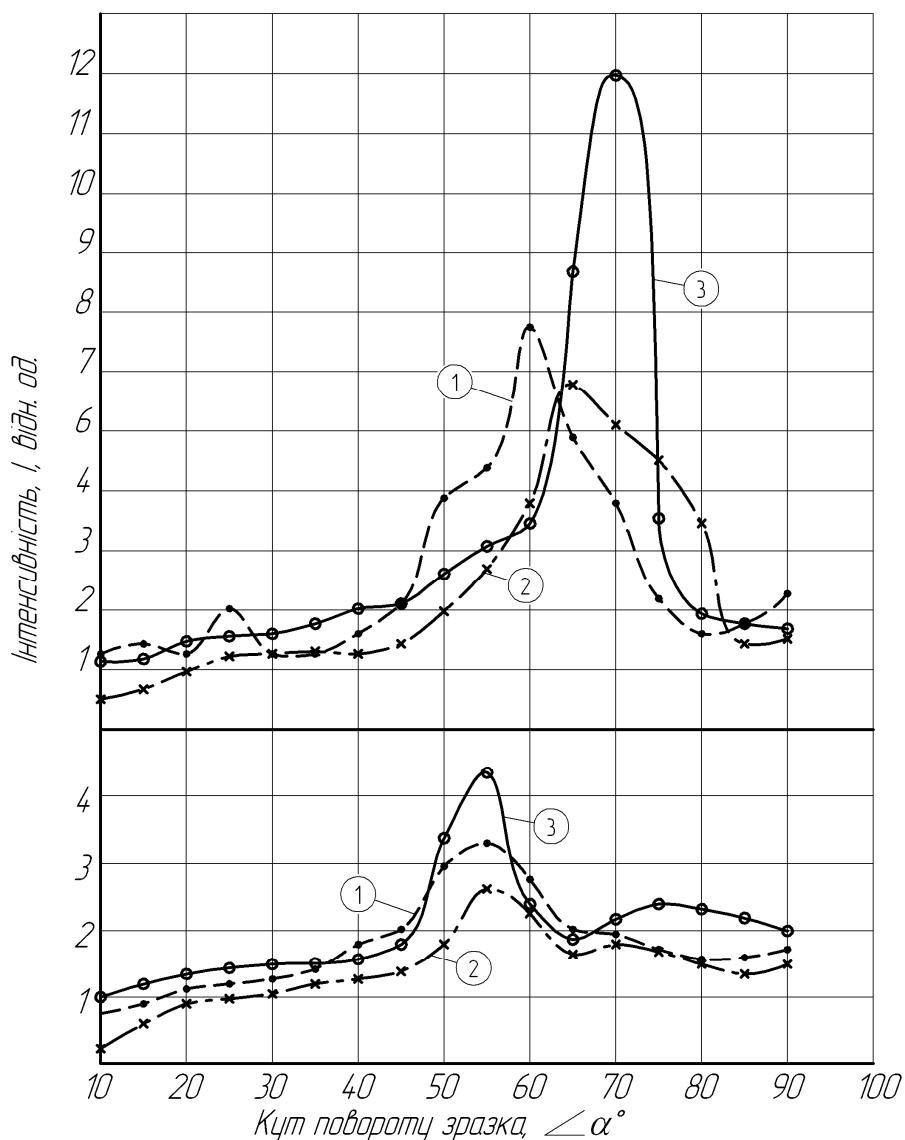


Рисунок 4 – Полюсна фігура холоднодеформованого дроту зі сплаву 45НХТВЮ для різних ступенів деформації: 1 –  $\varepsilon < 43\%$ ; 2 –  $\varepsilon \approx 68\%$ ; 3 –  $\varepsilon \approx 83\%$ .

Максимум полюсної фігури (111) в зразку з  $\varepsilon \approx 83\%$  приходиться на положення, яке відповідає теоретичному положенню напрямку  $\langle 111 \rangle$ , в зразку з  $\varepsilon \approx 68\%$  – максимум полюсної фігури відхиляється на  $5^\circ$ , а в зразку з  $\varepsilon < 43\%$  – на  $10^\circ$  від ідеального положення. Хоча збільшення ступеню деформації і збільшує ймовірність орієнтування  $\langle 111 \rangle$ , проте в зразку з  $\varepsilon \approx 83\%$  не досягається досконале орієнтування  $\langle 111 \rangle$ , про що свідчить ширина максимуму на полюсній фігурі. Отримані дані дозволяють обрати для подальших досліджень розробленого сплаву сумарну деформацію прутків  $\varepsilon \approx 68\%$ .

Також, проведеними дослідженнями встановлено, що в наклепаному сплаві просування фронту коміркового розпаду «вимітає» на своєму шляху дислокації в пересиченому твердому розчині, і, отже, до термодинамічного стимулу переривчастого розпаду, який полягає в різниці вільної енергії вихідної фази  $\alpha_n$ , і суміші ( $\alpha + \beta$ ), додається нова складова, пов'язана зі зменшенням концентрації дислокацій. Але водночас наклеп сприяє безперервному розпаду по всьому об'єму вихідних зерен. Частинки, що утворилися внаслідок безпе-

рервного розпаду, гальмують просування границь комірок переривчастого розпаду. Таким чином, пластична деформація після загартування здатне як прискорювати, так і утруднювати переривчастий розпад під час наступного старіння.

### Висновки

Позитивний вплив холодного деформування в схемі ТМО на властивості елінварів пов'язаний з наступними чинниками:

- 1) подрібнення зерна;
- 2) зменшенням розміру комірок переривчастої реакції, збільшенням частки матеріалу, в якому відбулася переривчаста реакція та її зміцненням завдяки наклепу;
- 3) зростанням величини добротності сплаву при збільшенні ступеню деформації.

Водночас наклеп після холодної деформації знижує пластичність та підвищує твердість. Це утруднює подальшу обробку матеріалу. Але зазначені недоліки можна усунути наступним старінням за умови збереження дрібнозернистої структури, що в свою чергу вимагає визначення оптимальних режимів старіння.

### Бібліографічний список

1. Стрижак В.А. Оптимизация структуры и свойств крупносортного элинвара и поверхностного слоя резонатора – основа технологии серийного производства монолитных упругих чувствительных элементов ВЧ-датчиков. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Свердловск: 1988.
2. Берштейн М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов: в 2-х т. / М.Л. Берштейн. – М.: Металлургия, 1968. – Т.1.: Термомеханическая обработка сплавов. – 1968. – 596 с., ил.
3. Бараз В. Элинварные сплавы: особенности состава, структуры и свойств. Ч.1 / В. Бараз, В. Стрижак // Национальная металлургия. – 2003. – №4. – С.96-98.
4. Бараз В. Элинварные сплавы: особенности состава, структуры и свойств. Ч.2 / В. Бараз, В. Стрижак // Национальная металлургия. – 2003. – №5. – С.101-105.
5. Кучма С.Н. Улучшение комплекса свойств элинварного сплава 44НХМТ методом комбинированной деформационно-термической обработки: Дис.: канд. тех. наук: 05.02.01: защищена 18.05.2010; утв. 10.10.2010 / Кучма Светлана Николаевна; ХНАДУ (ХАДИ). – Харьков, 2010.
6. Пат. 56892 Україна, МПК (2011.01) G21 D1/78 Установка для термомеханической обработки / С.М. Кучма, С.Ю. Стародубов; заявник і патентовласник Донбас. державн. техн. ун-т. – № и201009891; заявл. 09.08.2010; опубл. 25.01.2011, Бюл. № 2. – 2 с., ил.
7. Измерения в электронике / В.А. Кузнецов [и др.]; под ред. В.А. Кузнецова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 512 с., ил.

Рекомендовано до друку к.т.н., проф. Ульяницьким В.Н.